近30年青藏高原南缘地理环境状况及变迁研究*



刘荣高　刘 洋　徐新良　葛全胜

中国科学院地理科学与资源研究所　北京　100101

摘要　青藏高原南缘位于青藏高原与南亚次大陆的过渡地带，是西风带、南亚季风的交汇区域，对于气候和环境变化十分敏感。文章综合利用卫星遥感和地面观测等手段，分析了20世纪80年代以来青藏高原南缘的土地利用/覆盖、植被、降水、温度、人口和夜间灯光等自然和人文地理环境状况及其变迁。结果表明，青藏高原南缘土地利用覆盖以森林为主（48.62%）；植被主要分布在喜马拉雅山南麓山区和东部，东部植被状况明显好于中西部；区域降水集中在每年6—9月南亚夏季风时段，呈南多北少、东多西少之势；气温北低南高，空间差异大；除南部边缘外，人口密度整体偏低，夜间灯光覆盖率2013年仅为10%左右。近30年来，青藏高原南缘区域环境发生了显著变化。在自然环境方面，区域内气温显著升高，高海拔区域、夜间的温度升高更快；中东部降水显著减少，西部部分区域降水增加；在气温和降水变化影响下，中西部植被最大叶面积指数（leaf area index, LAI）普遍增大，东部则略有减小。人文环境方面，近年来区域中南部人类活动有所加强，区域内居民点增多，中部和南部的印度、尼泊尔境内人口密度增大；1992—2013年夜间灯光覆盖面积扩张了2.5倍，其中85%以上的扩张区域位于印度境内。

关键词　青藏高原，南缘，气候，地表特征，人类活动，变迁

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.2017.09.010

青藏高原是全球海拔最高的巨型构造地貌单元，被誉为“世界第三极”，具有独特的自然和人文环境。其剧烈隆起改变了亚洲的大气环流形势，促成了地球上最强大的亚洲季风系统，并对北半球的环流产生重要影响[1,2]。高原特殊的下垫面和大气过程使其成为全球气候与环境变化的敏感区。在气候变化和人类活动影响下，高原的冰川、冻土、积雪等冰冻圈剧烈变化[3-6]，生态系统的结构和功能以及重要物种的种群数量和结构也发生了深刻的变化[7]，对区域水循环、生态条件产生了巨大的影响，也给社会经济和防灾减灾带来了新

*资助项目：中科院重点项目（ZDRW-ZS-2016-6-3）
修改稿收到日期：2017年9月10日

挑战[8,9]。

青藏高原南缘沿喜马拉雅山南麓延伸，位于南亚次大陆与青藏高原的交接过渡地带，是西风带、南亚季风和东亚季风的交汇地带。该区域地形、气候和生态环境十分复杂，海拔从4 500米以上的喜马拉雅山脉迅速降低到200米左右的平原地带，气候也涵盖了高山的高寒气候和平原的热带季风气候，地表覆盖具有森林、农田、草地和冰雪等显著的垂直地带性。研究青藏高原南缘的地理环境和人文状况及其变迁，有助于认识高原及邻近区域对于气候变化，特别是西风带、亚洲季风变化的响应和适应状况。

该区域（特别是西部）的地面站点十分稀疏，卫星遥感为这种难抵达区域的空间连续监测提供了可能。本文综合利用地面观测和卫星遥感等技术手段，分析近30年青藏高原南缘的土地利用/覆盖、植被、温度、降水、人口和夜间灯光等自然和人文状况，刻画该区域的地理环境状况及其变迁。

2 数据和方法

2.1 数据

（1）*土地利用/覆盖相关数据*。采用Landsat卫星观测、Google Earth高分辨率影像，结合全球30米土地覆盖分类产品GlobeLand 30分析该区域土地覆被、土地利用的状况。其中，Landsat采用1990年和2015年附近的TM和ETM+晴空观测，分辨率为30米。GlobeLand 30是采用Landsat及环境-1等卫星影像，基于综合了面向像元、面向对象和专家知识的POK分类方法，获得的全球30米分辨率土地覆被数据，总体分类精度达到了80%以上，本文采用2010年分类结果[10]。

（2）*植被叶面积指数数据*。采用GLOBMAP叶面积指数（leaf area index, LAI）产品分析区域植被状况及变化。该产品是基于AVHRR和MODIS数据生成的全球1981年以来的高一致性叶面积指数数据[11]，空间分辨率为8公里，时间分辨率1981—1999年为15天，2000—2016年为8天。产品首先采用改进的GLOBCARBON LAI算法，基于MODIS数据反演叶面积指数，然后利用AVHRR与MODIS的重叠观测，针对每个像元建立了AVHRR SR-MODIS LAI关系，在此基础上实现了历史AVHRR数据的回溯反演。GLOBMAP解决了两种不同传感器差异引起的反演结果不一致的问题。

（3）*气候数据*。利用TRMM卫星日降水产品3B42Daily、MODIS地表温度产品MOD11A2和研究区域气象站点的降水与气温观测，分析区域内降水和温度等气候状况及其变迁。其中，TRMM日降水产品提供了每天的降水量，空间分辨率为0.25度，时间覆盖1989—2016年[12]。MODIS地表温度产品MOD11A2提供了每8天白天和夜间卫星过境时的地表温度，空间分辨率为1公里，时间覆盖2000—2016年[13]。地面观测采用了中国气象科学数据共享服务网的中国地面气候资料日值数据集（V3.0）的5个站点和NOAA NCDC的5个印度及尼泊尔站点的1980—2016年逐日降水量和逐日最高、最低及平均气温资料。中国的5个站点包括：普兰556960、聂拉尔557730、错那556900、隆子556550和帕里554370，位于研究区域北侧，海拔均在3 500米以上；尼泊尔及印度站点包括：DEHRADUN 421110、LILABARI 423090、DIBRUGARH 423140、TEZPUR 424150和TRIBHUVAN 444540，位于区域南侧，海拔在1 500米以下。

（4）*人口数据*。采用哥伦比亚大学国际地球科学信息网络中心（Center for International Earth Science Information Network, Columbia University）提供的全球人口格网数据第4版（Gridded Population of the World, Version 4, GPWv4）来表征区域人口密度分布[14]。该数据集基于人口统计数据，结合人口分布模型，生成了全球空间连续的人口分布。空间分辨率在赤道约为1公里，2000—2020年每5年发布1次，本文采用2005年和2015年的数据。

（5）*夜间灯光数据*。采用DMSP-OLS夜间灯光数据（V4版本）来描述区域人类活动的扩张。该数据包含无

云观测频数（number of cloud-free observations）、平均灯光（average of the visible bands digital number values）和稳定灯光（stable light images）3 个产品。本文采用的是稳定灯光产品，该产品经过了去云处理，并且消除了背景噪声及短时灯光数据（火山气体、森林火灾、极光等）[15]。像元灰度值介于 0—63 之间，数据可获取时间跨度为 1992—2013 年（年度合成数据），空间分辨率 1 公里。

2.2 方法

本文采用地理信息系统（geographic information system，GIS）空间分析、变化检测、线性趋势分析等方法，研究区域自然地理和人文要素的分布状况及时间变化，具体方法如下。

（1）*土地利用/覆盖*。利用 2010 年 GlobeLand30 土地覆被数据，获取研究区域 30 米的土地利用/覆盖分类图，分国别分析不同覆被类型的空间分布特征。针对变化的典型区域藏南地区，基于 Landsat TM/ETM+卫星影像和Google Earth 高分辨率影像，采用人工目视解译方法，获得 1990 年和 2015 年区域的居民地、机场等典型土地利用要素分布，分析其变化状况。

（2）*植被状况*。采用 1981—2016 年的 GLOBMAP LAI 数据，计算各像元每年叶面积指数序列中的最大值，获得各个年份的最大叶面积指数分布图。由于 1981 年数据不全，在时间序列分析中予以排除。对获得的 1982—2016 年共 35 年的最大叶面积指数进行线性拟合，分析各像元植被的状况和生长趋势变化。

（3）*气候要素*。利用 TRMM 1998—2016 年的数据，计算19 年间的年降水量平均值，并对每年的年降水量进行线性拟合，计算斜率分析其年际变化。利用2000—2016 年 MODIS 地表温度数据，分日夜计算每年的地表温度平均值以及平均日夜温差，分别进行每年结果的线性拟合，分析地表温度的变化。另外，基于 1980 年以来逐日气象站点观测，计算年降水量、月降水量、年平均气温、年最高气温、年最低气温、月平均气温、月最高气温和月最低气温，并分析降水量和气温的年际变化。在站点分析中，分海拔高于 3 500 米和低于 1 500 米分别分析。另外，尼泊尔及印度站点的缺测较多，特别是 1995 年以前，严重影响年际变化的可靠性，因此在年际分析中仅保留 DEHRADUN 421110 站点。

（4）*人类活动*。对比 2005 年和 2015 年人口密度分布图，分析区域人口变化。并利用 1992—2013 年 DMSP-OLS 夜间灯光数据，采用线性趋势拟合获得灯光数据灰度值的线性斜率，来表征区域人工建筑的变化模式。斜率大于 0 表示夜间灯光越来越亮，人工建筑呈现扩张趋势；小于 0 表示夜间灯光越来越暗，人工建筑呈现缩小趋势。

3 区域地理环境状况及变化

3.1 地表特征

3.1.1 地形

青藏高原南缘为高山平原过渡带，地势北高南低，高程落差大。图1为数字高程模型（digital elevation model，DEM）分布图。从南北向来说，区域北部为高耸的喜马拉雅山脉，海拔多在 4 000 米以上，世界最高峰珠穆朗玛峰即位于该区中部中国和尼泊尔交界处；南部为南亚次大陆，地势平坦，海拔多在 200 米以下。南北不到200公里的宽度，海拔落差却高达4 000米甚至6 000米以上，北部有众多5 000米甚至7 000米以上的高山，山高谷深坡度大，地形十分复杂。从东西向来说，区域西部和中部喜马拉雅山横亘，东部位于喜马拉雅山末端，分布着雅鲁藏布江大峡谷，海拔相对西部较低，多在 4 000 米以下。

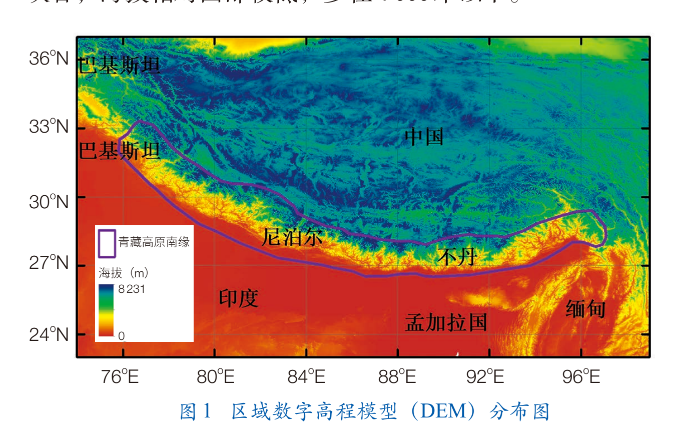


图 1　区域数字高程模型（DEM）分布图

3.1.2 土地利用/覆盖

图2为研究区域土地利用/覆盖分布图，表1为各类土地利用/覆盖在整个区域和各国境内的面积及占比。由图表可知，青藏高原南缘土地利用/覆盖类型以森林为主，森林总面积为21.18万平方公里，占南缘总土地面积的48.62%，其次为耕地和草地面积，分别为8.24万平方公里和7.56万平方公里，占南缘总土地面积的比例分别为18.92%和17.35%。另外，青藏高原南缘裸土地和永久性冰雪的面积也比较多，分别为3.75万平方公里和2.41万平方公里，占南缘总面积的比例分别为8.62%和5.52%。该地人口较少，居民地的面积仅为0.2万平方公里，仅占南缘总面积的0.46%。

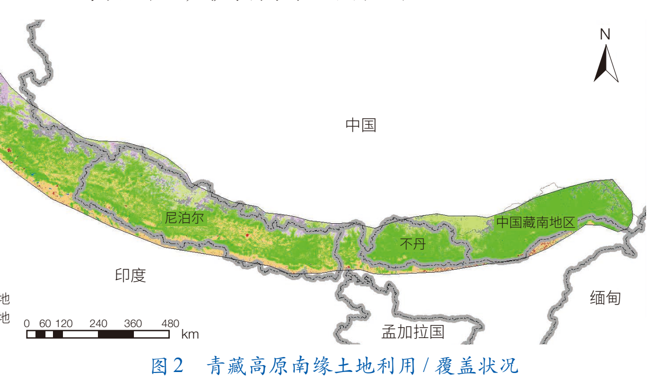


图2 青藏高原南缘土地利用/覆盖状况

青藏高原南缘主要涉及印度、尼泊尔、不丹、中国4个国家。西部的印度和尼泊尔境内均以森林和耕地为主，两种类型所占比例之和在两国境内分别为62.79%和71.58%；而东部的不丹和中国境内以森林和草地为主，两种类型所占比例之和在两国境内分别为93.19%和89.51%。

从各土地利用/覆盖类型在各国的分布看，青藏高原南缘印度境内森林和耕地的面积分别为4.23万平方公里和2.43万平方公里，森林和耕地占本国在研究区域总面积的比例为39.89%和22.90%。另外，草地和裸土地的面积也比较多，分别为1.66万平方公里和1.32万平方公里，草地和裸土地占总面积的比例分别为15.62%和12.42%。居民地面积为458平方公里，占总面积的比例为0.43%，在南缘4个国家中居民地面积和所占比例最高。

尼泊尔境内森林和耕地的面积分别为6.54万平方公里和3.7万平方公里，森林和耕地占本国在研究区域总面积的比例分别为45.71%和25.87%。另外，草地面积也比较多，为2.36万平方公里，占总面积的比例为16.5%。而尼泊尔境内居民地的面积比例仅次于印度，为382平方公里，占总面积的比例为0.27%。

不丹境内以森林分布为主，森林面积为2.83万平方公里，占本国在该地区总面积的比例为76.14%，远高于其他土地覆盖类型。此外，不丹境内草地面积为0.63万平方公里，占总面积的比例为17.05%，是该地区的第二大土地覆盖类型。不丹境内居民地的面积最少，仅占总面积的0.01%。

研究区域最东部的中国藏南地区（图2），森林的分布也占绝对优势，森林面积为5.72万平方公里，占藏南地区总面积的70.81%，远高于其他土地覆盖类型。另外，该地区草地面积为1.52万平方公里，占总面积的

表1 青藏高原南缘土地利用/覆盖类型面积统计表（面积单位：平方公里；比例单位：%）

土地利用类型	青藏高原南缘		印度		尼泊尔		不丹		中国	
	面积	比例	面积	比例	面积	比例	面积	比例	面积	比例
森林	211 772	48.62	42 296	39.89	65 402	45.71	28 340	76.14	56 612	70.77
耕地	82 409	18.92	24 284	22.90	37 017	25.87	1 207	3.24	778	0.97
草地	75 580	17.35	16 557	15.62	23 614	16.50	6 345	17.05	14 995	18.74
裸土地	37 522	8.62	13 168	12.42	11 320	7.91	489	1.31	1 541	1.93
永久冰雪	24 057	5.52	8 642	8.15	4 867	3.40	747	2.01	5 648	7.06
水体	2 197	0.50	627	0.59	490	0.34	89	0.24	276	0.35
居民地	1 992	0.46	458	0.43	382	0.27	5	0.01	147	0.18
合计	435 529	100	106 032	100	143 092	100	37 222	100	79 997	100

18.78%，也是该地区的第二大土地覆盖类型。中国的藏南地区被印度非法侵占后，由于印度不断移民，该地区人口逐步增加。图 3 为 1990 年和 2015 年此区域居民地和机场的分布状况。由图可知，该区域居民地主要沿河谷分布，1990 年居民地面积约为 70.63 平方公里，2015 年居民地的面积达到了 133.42 平方公里，占藏南总面积的 0.16%，该比例远远超过不丹境内的居民地占比。此外，该区域已建成机场 9 处，最北段的机场距离西藏米林县和墨脱县县城分别为 71 公里和 56 公里。

3.1.3 植被

图 4a 和 b 分别是青藏高原南缘 1982 年和 2016 年的最大叶面积指数图。由图可知，东部的植被状况明显好于中西部地区。对比两张图可以看出中西部虽然植被状况较东部较差，但 2016 年较之 1982 年有一定变好的趋势。

图 4c 为 1982—2016 年青藏高原南缘地区的年最大叶面积指数线性趋势拟合图。如图所示，研究区域植被生长状况逐年变好。具体来看，东部有部分区域斜率为0或负值，说明这些区域的植被状况在所研究的 35 年间没有太大变化或有所减少，这可能与区域降水减少有关（见 3.2.1节）；而中西部区域的斜率则都是正值，表明这些区域的植被在近年来一直在增长，这可能与温度升高而有利于植被生长有关（见 3.2.2 节）。

3.2 气候

青藏高原南缘位于西风带、南亚季风和东亚季风的交汇地带，西部主要受西风带影响，中东部则主要由南亚季风控制，区域降水和温度呈现显著的空间和季节分异。由于全球变暖、亚洲季风减弱和西风带增强等大气候系统的变化，近 30 年该区域降水和温度也呈现了相应的变化。

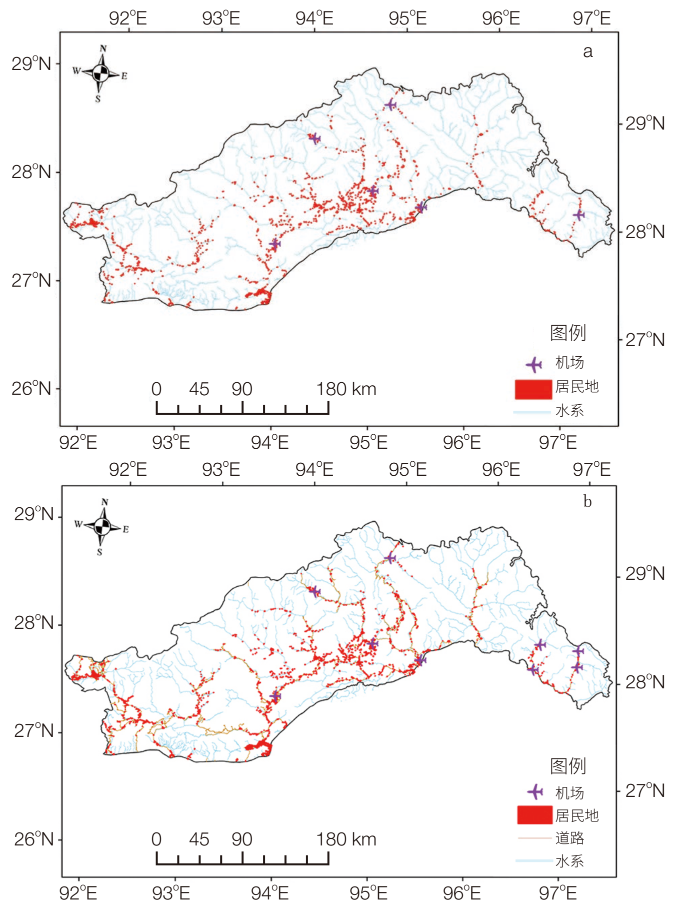


图 3　1990 年（a）和 2015 年（b）中国藏南地区土地利用覆盖状况

3.2.1 降水

图 5a 为青藏高原南缘 1998—2016 年 TRMM 平均年降水量分布图，可见研究区域的降水量呈现南部多、北

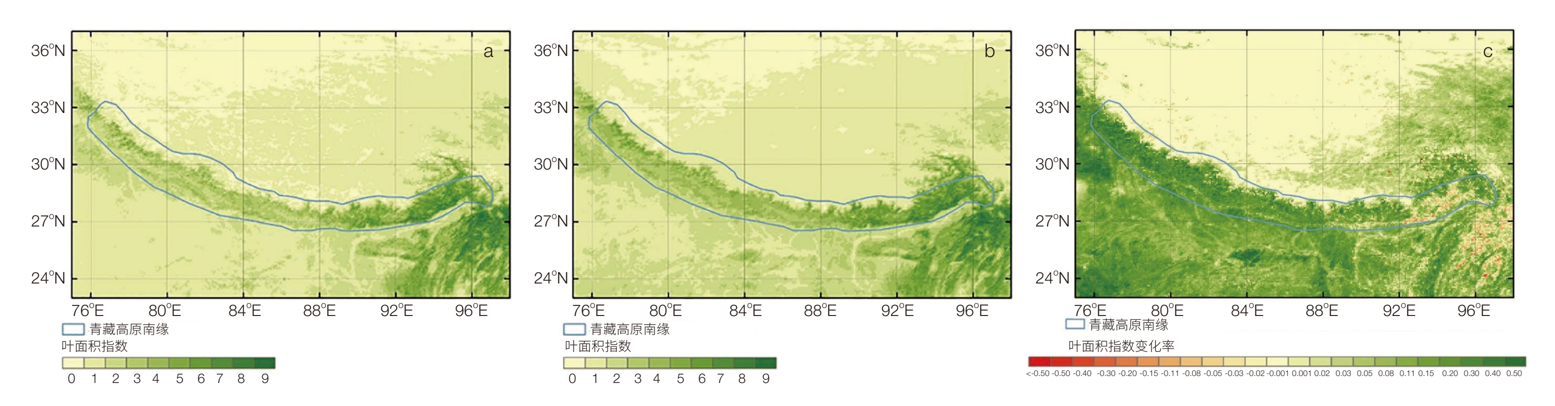


图 4　1982 年（a）和 2016 年（b）青藏高原南缘最大叶面积指数及其 1982—2016 年线性拟合斜率（c）

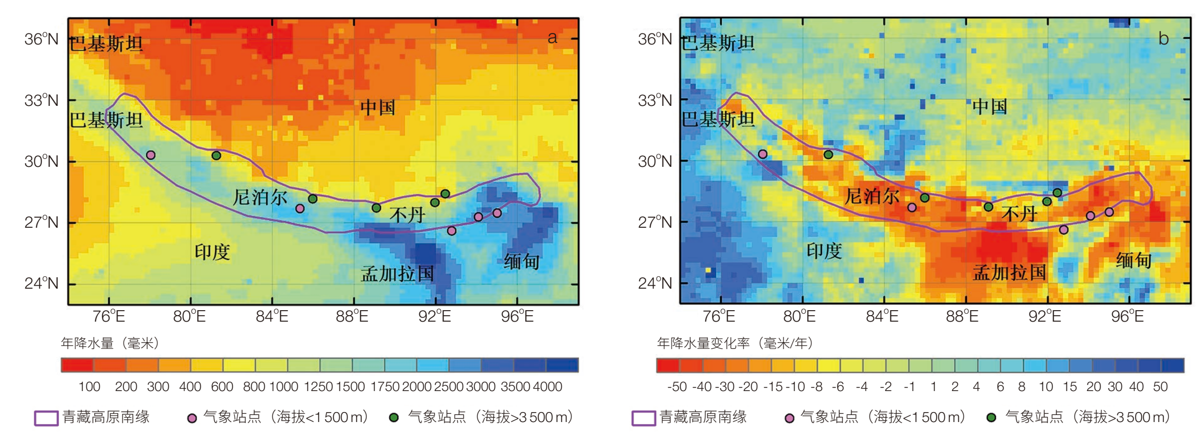


图 5　青藏高原南缘 1998—2016 年平均 TRMM 年降水量（a）及年降水量变化率（b）分布图

部少、东部多、西部少的特征。高大的喜马拉雅山迎接了南亚夏季风带来的印度洋的丰沛水汽，在区域的中部及东部形成了强降雨中心，TRMM 年降水量在 88°E—97°E 区域可高达 2 000 毫米以上。区域西侧受到西风带和南亚季风的双重作用，TRMM 年降水量也可达 1 000 毫米以上。区域南侧为迎风坡，拦截了来自印度洋的丰沛水汽，年降水量多在 1 500 毫米以上；而北侧海拔多在 3 000 米以上，降水量多在 800 毫米以下，小于南部。

图 6 为 1980—2016 年海拔高于 3 500 米和低于 1 500 米的气象站点的月降水量及年降水量折线图。可见在研究区域的降水季节分布上，降水集中在 6—9 月，特别是 7—8 月降水量最大，这主要是受南亚夏季风影响。南部海拔低于 1 500 米的区域 7—8 月降水量平均在 200—250 毫米之间，北部海拔高于 3 500 米的区域平均也可达到 60—80 毫米。南缘西部冬季可以同时得到西风带带来的降水，在位于南缘西部的聂拉尔和普兰站，可以看到在 1—4月呈现了一个小的降水峰。

不同于整个青藏高原整体情况，研究区域降水量呈现了显著减少趋势（图 5b）。1989—2016 年的 TRMM 数据拟合显示，在研究区域的中部和东部，年降水量减

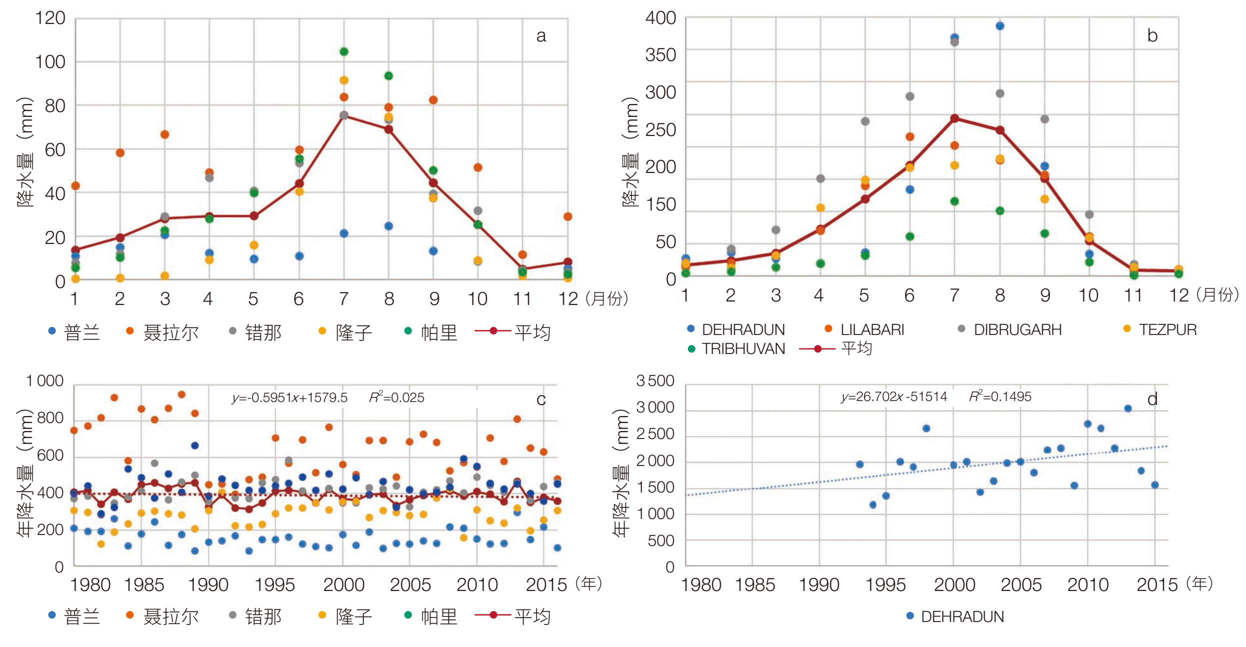


图 6　1980—2016 年气象站点月降水量及年降水量图

（a）海拔高于 3 500 米气象站点平均月降水量；（b）海拔低于 1 500 米气象站点平均月降水量；（c）海拔高于 3 500 米气象站点年降水量；（d）海拔低于 1 500 米气象站点年降水量

小十分显著；气象站点的观测（图 6c）也支持了这一结果，平均年降水量以 5.95 毫米/10 年的速度缓慢减少，这可能与近年来南亚夏季风的减弱有关[16]。而在区域西部的局部地区，TRMM 的年降水呈现了增加的趋势，印度 DEHRADUN 站点（30.317°N, 78.033°E）1993 年以来的降水观测也以 267.02 毫米/ 10 年的速度增加，这可能与西风带增强有关。

3.2.2 温度

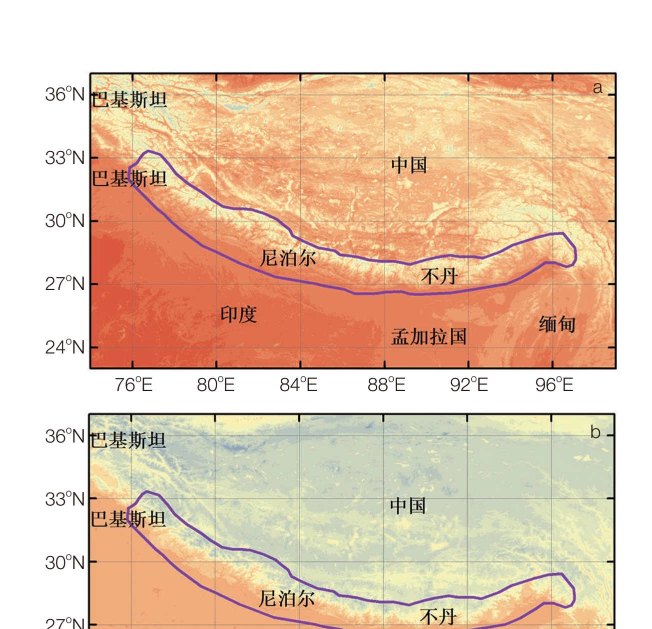
由于研究区域内海拔的巨大落差，温度北低南高，呈现出巨大的空间差异（图 7）。青藏高原南缘北部海拔高于 3 500 米的站点，夏季（每年 6—8 月）平均气温在 10°C 左右，而南部海拔低于 1 500 米的区域夏季月平均气温在 25°C 以上（图 8）。夏季最高气温北侧在 20°C 左右，而南侧则接近 40°C。全年最低气温北侧可达−25°C 以下，而南侧则多在 0°C 以上。

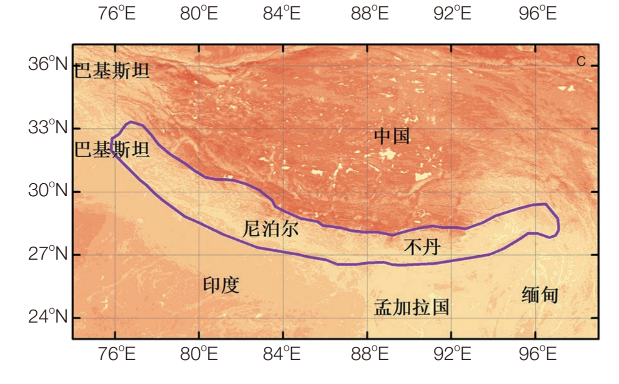
受全球变暖的影响，区域气温也呈现了显著的增加趋势（图 9），实测结果亦然（图 8c和 d）。自1980 年以来，北侧海拔高于 3 500 米的站点，年均温以0.35°C/10 年的趋势在升高，年最高气温和最低气温分别以 0.03°C/10 年和 0.64°C/10 年的趋势在升高；南侧海拔低于 1 500 米的站点，年均温和最高气温以 0.22°C/10 年和 0.23°C/10 年的趋势在升高，而最低气温则以 0.41°C/10年的趋势在降低。海拔较高的区域气温升高更加显著，这与其他研究发现的地形对全球变暖的强化效应一致。2000 年以来该区域白天和夜间的地表温度均呈现了升高的趋势，夜间温度升高的趋势快于白天（图 9）。区域日夜温差较大，且北部高海拔区域大于南部。区域平均日夜温差在 10—15°C，最大日夜温差可达 20°C 以上，而北部高海拔区域甚至在 30°C 以上，日夜平均温差呈现减小趋势。

3.3 人类活动

3.3.1 人口

研究区域除南部边缘平原区域外，人口密度整体较低（图10）。北部高山区人口密度最低，普遍低于 100 人/平方公里。中部山区人口密度升高到 100—200





温度（°C）

-45 -40 -35 -30 -25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45

青藏高原南缘

图 7　青藏高原南缘 2000—2016 年 MODIS 地表温度状况图
（a）白天平均地表温度；（b）夜间平均地表温度；（c）日夜平均温差

人/平方公里，在研究区中部的尼泊尔境内出现数个人口聚居（密度>300 人/平方公里）的居民点。南部边缘位于平原区域，人口密度显著增高，大多高于 400 人/平方公里，位于研究区域西部的印度境内某些区域可达 1 000 人/平方公里以上。

从整个大区域来说，青藏高原人口密度也显著低于南部平原区域，普遍在 50 人/平方公里以下，北部甚至存在大面积无人区；而南部平原印度和孟加拉国境内人口密集，印度北部本身也是印度人口高密度区域之一。从

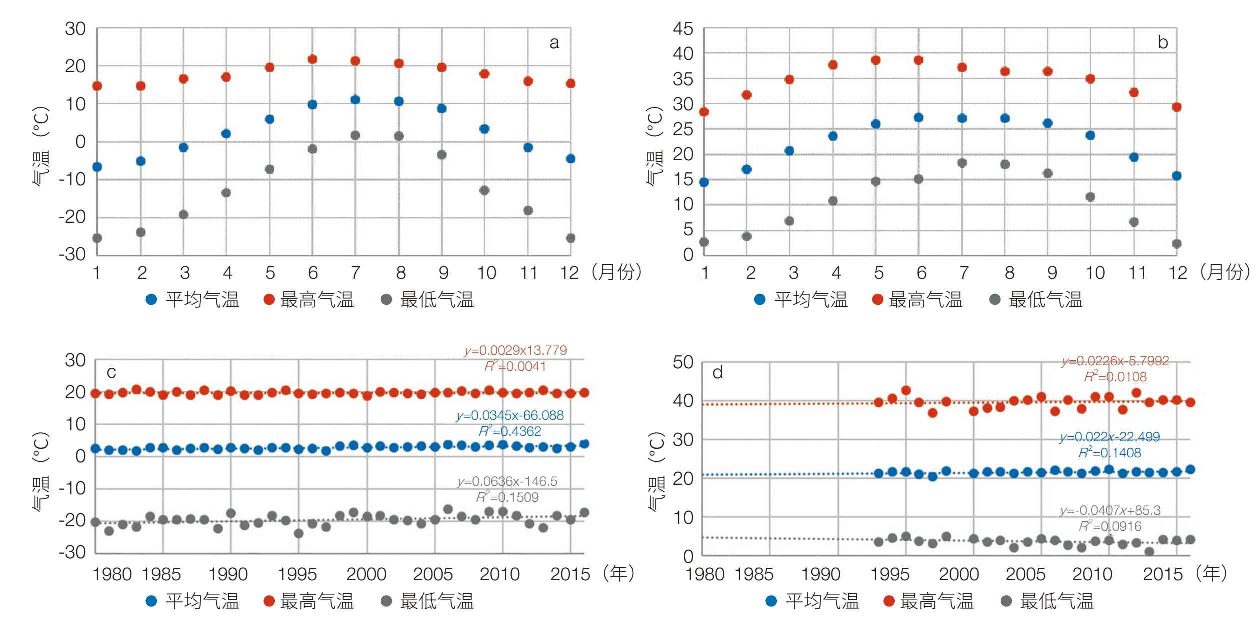


图 8　1980—2016 年气象站点的月气温及年气温状况图

（a）海拔高于 3 500 米气象站点平均月平均、最高和最低气温；（b）海拔低于 1 500 米气象站点平均月平均、最高和最低气温；（c）海拔高于 3 500 米气象站点年平均、最高和最低气温；（d）海拔低于 1 500 米气象站点年平均、最高和最低气温

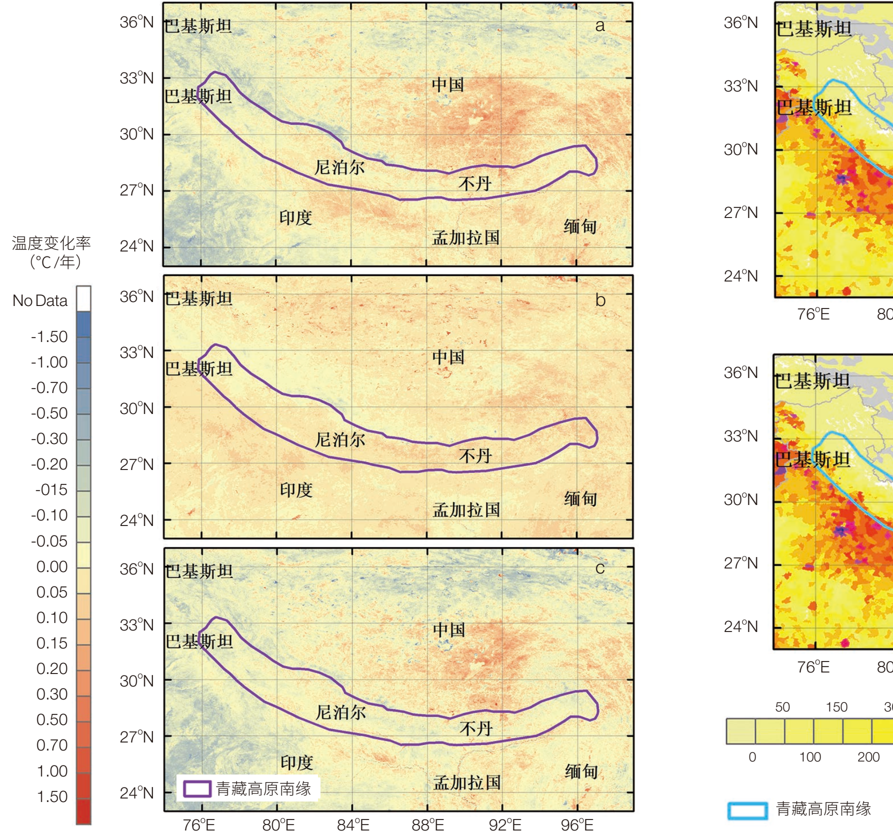


图 9　2000—2016 年 MODIS 地表温度变化图

（a）白天平均地表温度；（b）夜间平均地表温度；（c）日夜平均温差

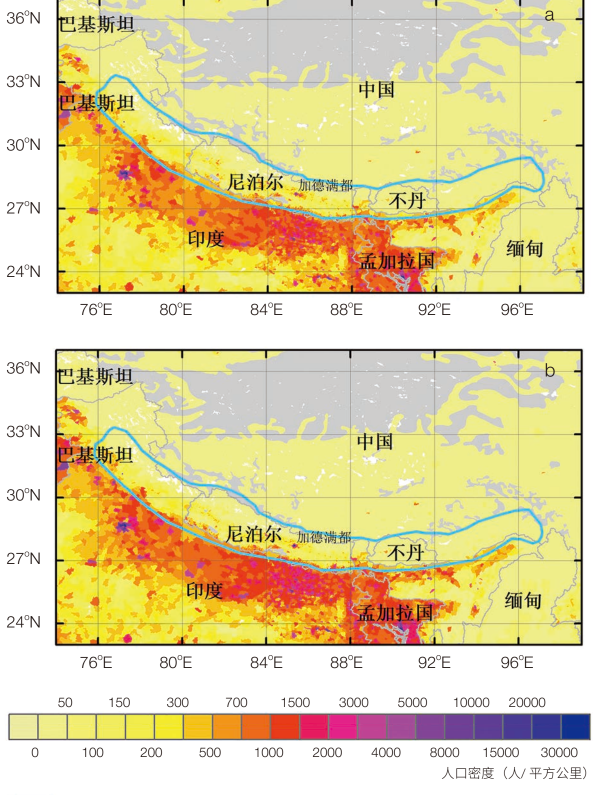


图 10　2005 年（a）和 2015 年（b）青藏高原南缘人口密度分布图

2005 年与 2015 年对比来看，这 11 年期间北部青藏高原区域内人口密度并未发生明显变化，不丹人口变化也不大。印度、尼泊尔境内，人口密度有所增大，特别是印度和尼泊尔的一些大城市人口密度上升。如尼泊尔首都加德满都，人口密度由 2005 年的 8 000人/平方公里左右升高到 30 000 人/平方公里以上。说明研究区域的南部人类活动加强。

3.3.2 夜间灯光

如图 11 a 和 b 所示，1992 年青藏高原南缘整个区域的灯光覆盖率仅为 3.1%。该区域内，绝大部分灯光覆盖分布在印度（81.02%），少部分分布在尼泊尔（17.59%）主要城市，不丹的灯光覆盖占 1.23%，孟加拉占 0.17%，中国在该区域内无灯光覆盖。2013 年，青藏高原南缘整个区域的灯光覆盖率为 10.8%（相当于 1992 年的 3.5 倍）。其中，84.84% 的灯光覆盖分布在印度，12.46% 分布在尼泊尔，2.27% 分布在不丹，0.28% 分布在孟加拉，0.13% 分布在中国。

图11c 为 1992—2013 年夜间灯光的线性变化趋势，可见夜间有灯光覆盖的区域中，96.1% 呈现出灯光数量增长趋势，2.6% 呈现出减小趋势，1.3% 不变。显著增长的区域主要分布在研究区域西部的印度（81.02%）喜马偕尔邦、乌塔兰恰尔邦，以及研究区域中东部（尼泊尔与不丹之间）印度的锡金邦和西孟加拉邦，该结果与 Pandey 等[17]在印度喜马偕尔邦和乌塔兰恰尔邦 1992—2008 年描述的人工建筑扩张结果一致。相对于 1992 年，2013 年青藏高原南缘的灯光覆盖区域扩张了约 2.5 倍。其中，印度扩张的区域占总扩张区域的 85.89%，尼泊尔占 10.37%，不丹占 3.41%，孟加拉占 0.33%，中国占 0.18%。

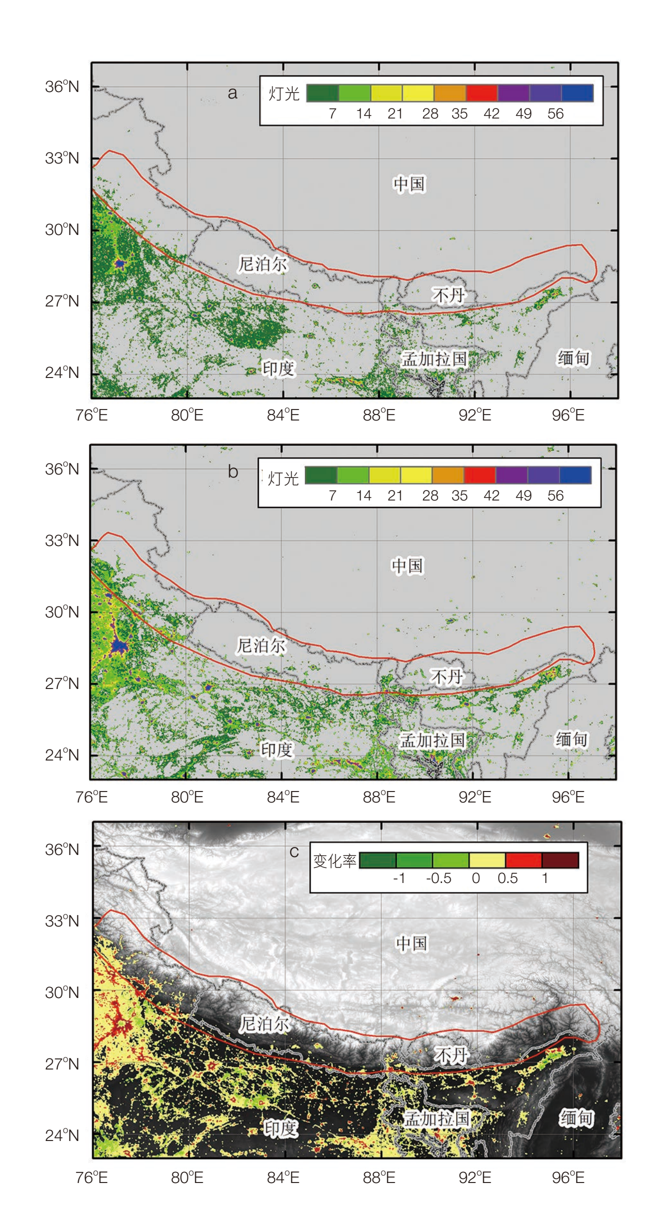


图 11　1992 年（a）和 2013 年（a）青藏高原南缘夜间灯光分布及其变化情况（c）图

4 结论

本文结合卫星遥感和地面观测，分析了青藏高原南缘的地形、土地覆盖、植被、气候和人类活动等状况及其近 30 年的变化，主要结果如下。

（1）地表特征。青藏高原南缘海拔落差大、地形复杂，土地利用/覆盖类型多样，居民地占比最小，但近年来在中国藏南地区等区域有较显著的增长。区域植被以森林为主，植被主要分布在喜马拉雅山南麓山区和东部，东部的植被状况明显好于中西部地区。1982 年以来，大部分地区植被状况转好，东部部分区域最大叶面积指数变化不大或有所减小，而中西部则普遍增大。

（2）气候。区域降水南多北少，东多西少，降水集中在每年 6—9月，西部冬季受西风带影响也可出现降水高峰。中东部降水显著减少，西部部分区域降水增加。

区域地表温度和气温北低南高，呈现出巨大的空间差异。该区域温度显著升高，高海拔区域、夜间温度升高更快，日夜温差在减小。

（3）人类活动。区域人类活动强度较低，人口密度低，南部人口密度大于北部。人工建筑稀疏、夜间灯光覆盖较少。但在近年来人口和夜间灯光都呈现了增长，且增长多位于研究区域南部的印度及尼泊尔境内。1992—2013年间，夜间灯光覆盖扩展了2.5倍，覆盖率由3.1%提高到10.8%。印度扩张的区域占总扩张区域的85.89%。

参考文献

1 李吉均, 方小敏. 青藏高原隆起与环境变化研究. 科学通报, 1998, 43(15): 1569-1574.

2 吴国雄, 毛江玉, 段安民, 等. 青藏高原影响亚洲夏季气候研究的最新进展. 气象学报, 2004, 62(5): 528-540.

3 Shi Y F, Liu S Y. Estimation of response of glaciers in China to global warming in 21st century. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(4): 434-438.

4 Bolch T, Kulkarni A, Kaab A, et al. The state and fate of Himalayan Glaciers. Science, 2012, 336: 310-314.

5 Yao T D, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. Nature Climate Change, 2012, 2(9): 663-667.

6 姚檀栋, 秦大河, 沈永平, 等. 青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响. 自然杂志, 2013, 35(3): 179-186.

7 张宪洲, 杨永平, 朴世龙, 等. 青藏高原生态变化. 科学通报, 2015, 60: 3048–3056.

8 吴国雄, 段安民, 张雪芹, 等. 青藏高原极端天气气候变化及其环境效应. 自然杂志, 2013, 35(3): 167-171.

9 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来. 科学通报, 2013, 60: 3025-3035.

10 Chen J, Liao A P. Global land cover mapping at 30m resolution: a POK-based operational approach. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 103: 7-27.

11 Liu Y, Liu R G, Chen J M. Retrospective retrieval of long-term consistent global leaf area index (1981-2011) from combined AVHRR and MODIS data. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences, 2012, 117 (G04003): 1-14.

12 Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1998, 15: 809-817.

13 Wan Z, Li Z L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data. IEEE Transanction on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(4): 980-996.

14 Center for International Earth Science Information Network - CIESIN - Columbia University. 2016. Documentation for the Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4). Palisades NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). [2017-08-01]. http://dx.doi.org/10.7927/H4D50JX4.

15 Small C, Pozzi F, Elvidge C D. Spatial analysis of global urban extent from DMSP-OLS night lights. Remote Sensing of Environment, 2005, 96: 277-291.

16 Wu B Y. Weakening of Indian summer monsoon in recent decades. Advances in Atmospheric Sciences, 2005, 22: 21-29.

17 Pandey B, Joshi P K, Seto K C. Monitoring urbanization dynamics in India using DMSP/OLS night time lights and SPOT-VGT data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013, 23: 49-61.

Change of Geographical Environment in Southern Margin of Tibetan Plateau since 1980s

Liu Ronggao Liu Yang Xu Xinliang Ge Quansheng

(Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract The southern margin of the Tibetan Plateau is located in a transitional zone between the plateau and the South Asia Sub-continent. It is also an intersectional region of the westerlies and the South Asia Summer Monsoon (SASM). This region is quite sensitive to the changes of global climate system and regional environment. Combined with satellite remote sensing and field observations, the inter-annual variability of natural and human geography conditions of the margin have been investigated. The results show that this region is covered mainly by forest (48.62%). The vegetation is mainly distributed in southern edge of the Himalayas and the eastern part of the region, with vegetation cover higher in eastern than in mid-western region. The precipitation is higher in the east than in the west and most of them occur in June to September. The population is quite scarce except for the southern edge. In recent 30 years, local environments present remarkable changes. In the natural environment, regional temperature rose especially at the higher altitude and during the nighttime, while precipitation rose in some western parts and decreased significantly in middle and eastern parts of the region. Due to the changes of temperature and precipitation, maximal leaf area index increases in the middle west while it is decreased in eastern part. In the cultural environment, the residential areas and population density increased in recent years, especially in middle-southern part in India and Nepal. The coverage of night light area has extended 2.5 times from 1992 to 2013, while more than 85% extended light area is located in India.

Keywords Tibetan Plateau, southern margin, climate, land surface conditions, human activity, changes

刘荣高 中科院地理科学与资源所研究员，博士生导师。中科院资源环境科学数据中心主任、资源与环境信息系统国家重点实验室副主任，中国自然资源学会常务理事暨自然资源信息系统研究专业委员会主任。主要研究领域包括：全球遥感参数产品、资源环境遥感分析以及定量遥感反演关键基础问题。E-mail: liurg@igsnrr.ac.cn

Liu Ronggao Received his B.S. degree from Chengdu College of Geology, China, in 1993, and the M.S. degree and Ph.D. from Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, China, in 1996 and 2000, respectively. He is currently a professor with the Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences and the director of Data Center for Resources and Environment, Chinese Academy of Sciences. His research interests cover algorithms for parameters retrieval and development of processing system for global long-term remote sensing data. E-mail: liurg@igsnrr.ac.cn